Cours de Physique Acoustique

C. Adessi
(christophe.adessi@univ-lyon1.fr)

Plan du cours :

Chapitre I :	Notions générales d'acoustique
Chapitre II :	Acoustique de la voix parlée
Chapitre III :	Psycho-acoustique et Acoustique environnementale
Chapitre IV :	Acoustique musicale et Electro-Acoustique

http://ilm-perso.univ-lyon1.fr/~cadessi/orthophonie.html

Bibliographie

http://www.phon.ucl.ac.uk/resource/educational.php

http://www.ncvs.org/ncvs/tutorials/voiceprod/index.html

http://www.phys.unsw.edu.au/jw/speech.html

http://www.spirit-science.fr/doc_musique/Intonation.html

Biophysique de l'environnement sonore, C. Gelis, Ellipses, Paris, 2002

Acoustique et Musique, E. Leipp, Masson, Paris, 1984

Théorie de la musique, A. Danhauser, Ed. Henry Lemoine, 1996

Initiation à l'acoustique, A. Fischetti, Belin, Paris, 2004

Psychoacoustique et perception auditive, M.-C. Botte, INSERM/SFA/EM Inter., Paris, 1989

The science of sound, T. Rosing, F. Moore & P. Wheeler, Addison Wesley, San Francisco,2002

I. Notions Générales de Physique Acoustique

$I.1$ Rappel sur les Unités

- Les unités sont les étalons pour la mesure de grandeurs physiques.
- Les grandeurs physiques sont liées par un système unifié d'unités.
- SI (système international) ou MKS (mètre kilogramme seconde) correspond au standard international.
- Toutes les grandeurs physiques (Force, Energie, Pression, Vitesse ...) peuvent être définies comme une combinaison d'unités de base : longueur, masse et temps : m, kg, s.
- Par souci de simplification, certaines unités portent le nom de physiciens.

Unités de Base

- longueur → mètre (**m**)
- masse → kilogramme (**kg**)
- temps → seconde (**s**)

Unités dérivées

- force → Newton (**N**)
- pression → Pascal (**Pa**)
- énergie → Joule (**J**)
- puissance → Watt (**W**)
- fréquence → Hertz (**Hz**)

- $1\ \mathrm{N} = 1\ \mathrm{m.kg/s^2}$
- $1\ \mathrm{J} = 1\ \mathrm{m^2.kg/s^2}$
- $1\ \mathrm{Hz} = 1\ \mathrm{s^{-1}}$

$I.2$ Notations scientifiques

- $10^n = \underbrace{10 \times 10 \times \ldots \times 10}_{n}$

  $10^6 = 1\,000\,000 = 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10$

- $10^{-n} = \left(\frac{1}{10}\right)^n = \underbrace{\frac{1}{10} \times \frac{1}{10} \times \ldots \times \frac{1}{10}}_{n}$

  $10^{-3} = \frac{1}{10^3} = \frac{1}{10} \times \frac{1}{10} \times \frac{1}{10} = 0,001$

Exemples :

- $31\,536\,000$ s $= 31\,536 \times 10^3$ s $= 31,536 \times 10^6 = 31,536$ Ms

- $0,0000667$ s $= 0,667 \times 10^{-4} = 66,7 \times 10^{-6} = 66,7\ \mu$s

- $15\,000$ Hz $= 15 \times 10^3$ Hz$=$ 15 kHz

Opérations :

- $10^n \times 10^m = 10^{n+m}$

  $10^6 \times 10^{-3} = 10^{6-3} = 10^3 = 1000$

- $10^n / 10^m = 10^{n-m}$

  $10^6 / 10^{-3} = 10^{6+3} = 10^9$

$$\frac{0{,}000\,008 \times 4\,500\,000}{12\,000 \times 0{,}000\,05} = \frac{8 \times 10^{-6} \times 4{,}5 \times 10^6}{1{,}2 \times 10^4 \times 5 \times 10^{-5}} =$$

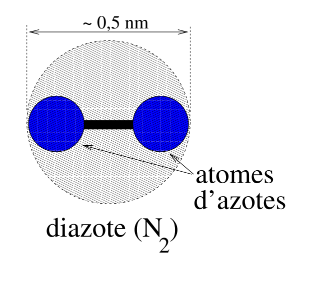
$$\frac{8 \times 4{,}5}{1{,}2 \times 5} \times 10^{-6+6-4+5} = 6 \times 10^1 = 60$$

Multiples et sous-multiples :

10^{-15}	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	10^3	10^6	10^9	10^{12}	10^{15}
fento	pico	nano	**micro**	**milli**	**kilo**	**méga**	**giga**	tera	peta
f	p	n	μ	m	k	M	G	T	P

II.1 Pression d'un gaz

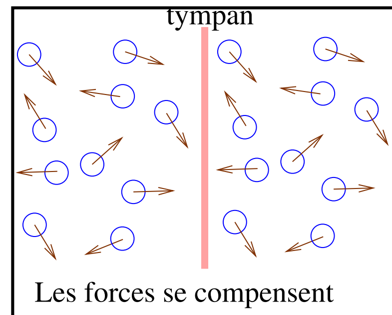
Description de l'air :

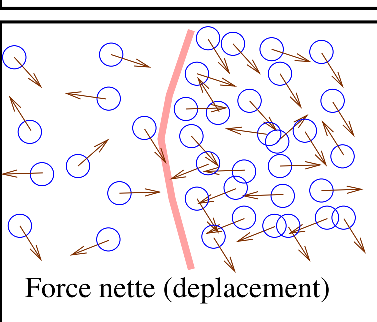


78% N_2, 21% O_2

- Vitesse moyenne des molécules : 1400 km/h
- Nombre de chocs par seconde : 5 000 000 000 collisions/s

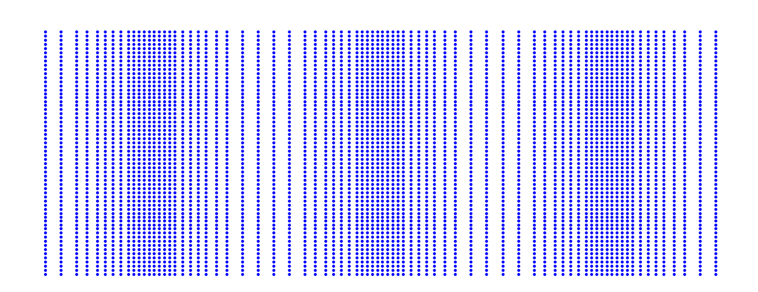
- La température correspond à une agitation ératique des molécules.
- Les molécules n'ont pas de directions privilégiées.
- Les "chocs" des molécules donnent lieu à des forces (ou pression).





- Même nombre de molécules des 2 cotés $\Rightarrow$ même forces (pas de déplacement)
- S'il y a plus de molécules à droite, il y a plus de "chocs" de ce coté et donc une force nette apparait ce qui induit un déplacement du tympan.

Onde Acoustique (sons)



- Un son correspond à des variations locales de la pression
- Zone de surpression (+ de mol.) et de dépression (- de mol.)
- La succession de surpressions et de dépressions va faire vibrer le tympan.

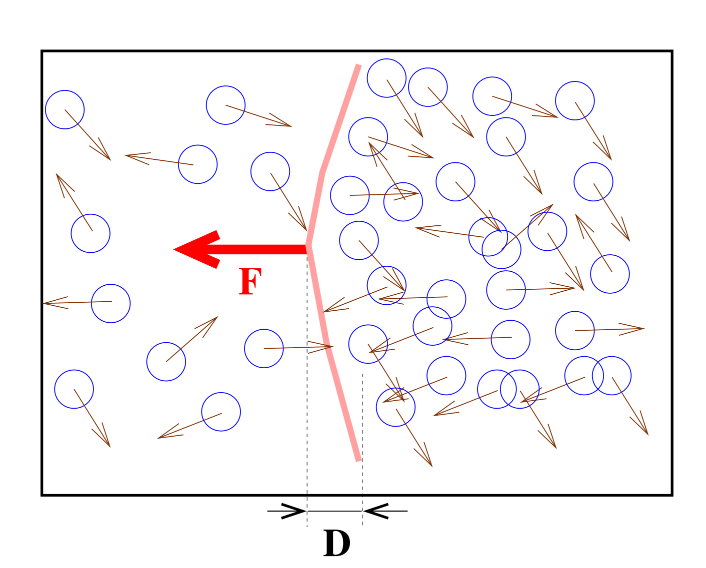
$II.2$ Notion de Force

- Une force traduit une interaction entre deux corps
  - Interaction à distance : force gravitationnelle, force électrostatique
  - Interaction en contact : force exercée par l'intermédiaire d'une surface.
- Les force exercées par les molécules d'un gaz sur une paroi sont des interactions de contact.
- Unité d'une force : Newton (N)
- Le déplacement du tympan (sous l'action des forces exercées par les molécules) correspond à un transfert d'énergie.

- L'énergie reçue par le tympan se quantifie par :

$$E = F \times D$$

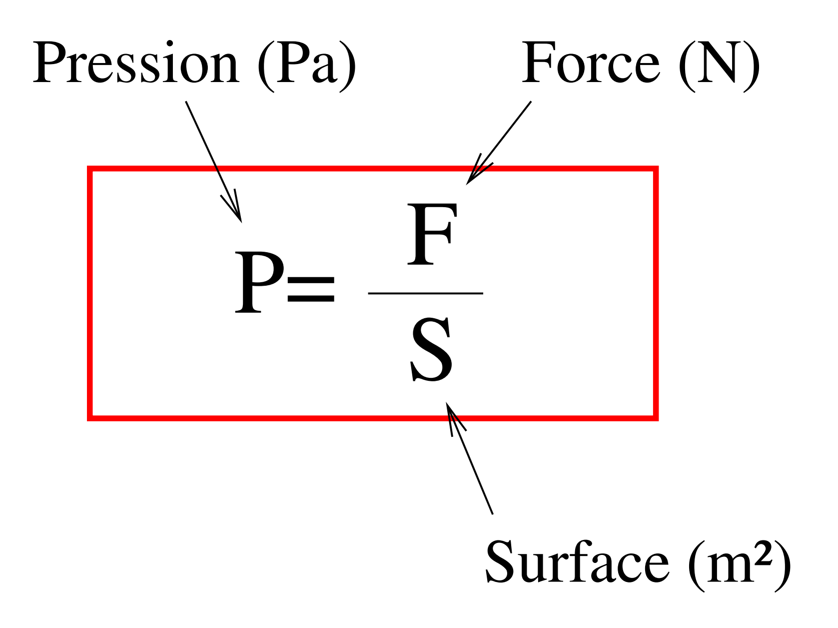
- unité : Joule (J)
- L'énergie reçue chaque seconde est la puissance :
- unité : Watt (W)



$II.3$ Notion de Pression

La pression se définit comme l'application d'une force d'un corps à un autre par l'intermédiaire d'une surface.

- La transmission de la force se fait **obligatoirement** par l'intermédiaire d'une surface.
- A l'échelle atomique, la pression de l'air correspond aux forces exercées par les molécules lors des chocs sur les parois.
- La pression atmosphérique est due aux forces qu'exercent en permanence les molécules d'air.
- La Pression acoustique définit les variations de la pression en présence d'un son.



- unité : Pascal (Pa)
- Valeurs typiques :
  - Pression atmosphérique : $10\,000$ Pa
  - Pression acoustique maximum d'un son audible : ± 20 Pa (La pression varie entre $9\,980$ Pa et $10\,020$ Pa).

II.4 Notion d'Intensité Acoustique (I)

- La transmission d'un son se fait obligatoirement par une surface.
- Intensité acoustique $\Rightarrow$ énergie véhiculée par un son pendant une seconde et sur une surface de 1 m^2.
- $I = \frac{\text{Energie}}{\text{Surface} \times \text{Temps}}$
- Unité : Watt/m^2

Résistance acoustique (R)

- Traduit la résistance à la mise en mouvement des molécules d'air soumisent à une pression.
- R permet de lier l'intensité avec la pression.

$$I = P^2/R$$

- $R_{air} = 400$ Pa.s/m, $R_{eau} = 1,5 \times 10^6$ Pa.s/m

Ordres de grandeur

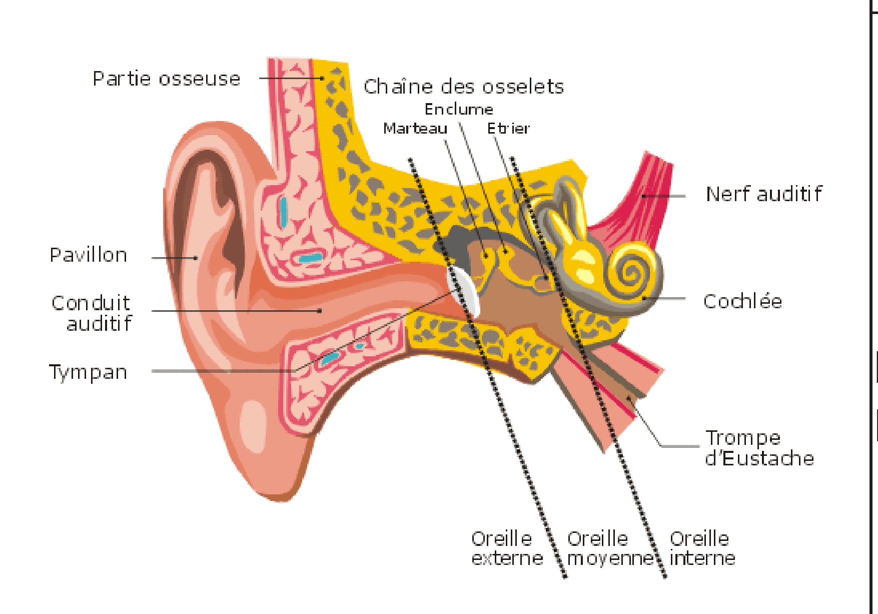
Seuils de sensibilité à 1 kHz :

seuil d'audition		seuil douleur
10^{-12} W/m^2 <	I	< 1 W/m^2
2×10^{-5} Pa <	P	< 20 Pa

Remarque :

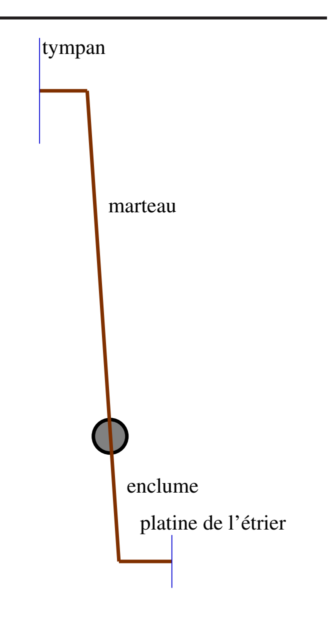
- La sensibilité à l'intensité acoustique n'est pas linéaire.
- À 1 kHz, on a un facteur 10^{12} entre le seuil d'audition et le seuil de douleur.
- Pour exprimer l'intensité d'une onde on effectue un changement d'échelle non linéaire $\Rightarrow$ échelle logarithmique ou échelle en Décibel.

$II.5$ Mécanisme d'amplification de la pression de l'oreille moyenne

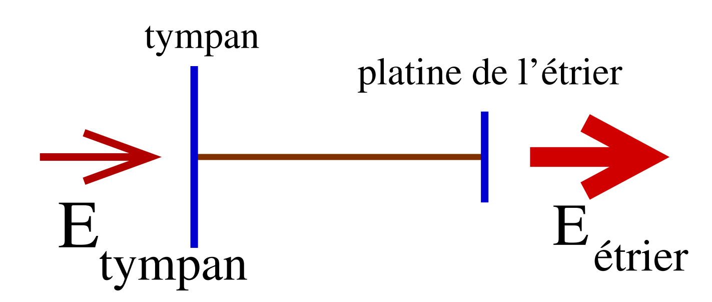


- Effet de Levier : $F_{\text{étrier}} > F_{\text{tympan}}$
- Dû au fait que : $L_{\text{marteau}} > L_{\text{enclume}}$
- Rapport des surfaces tympan/étrier :

$$S_t \simeq 0,65\,\text{cm}^2$$
$$S_e \simeq 0,03\,\text{cm}^2$$



Modèle simplifié : On néglige l'effet de levier



En l'absence de réflexe stapédien : $E_{\text{étrier}} = E_{\text{tympan}}$
Même déplacement du tympan et de l'étrier, donc :

$$F_{\text{étrier}} = F_{\text{tympan}}$$
$$P_{\text{e}} \times S_{\text{e}} = P_{\text{t}} \times S_{\text{t}}$$
$$P_{\text{e}} = P_{\text{t}} \times \frac{S_{\text{t}}}{S_{\text{e}}}$$

- Les pressions sont différentes car :

$$\frac{S_{\text{t}}}{S_{\text{e}}} = \frac{0,65}{0,03} \simeq 20$$

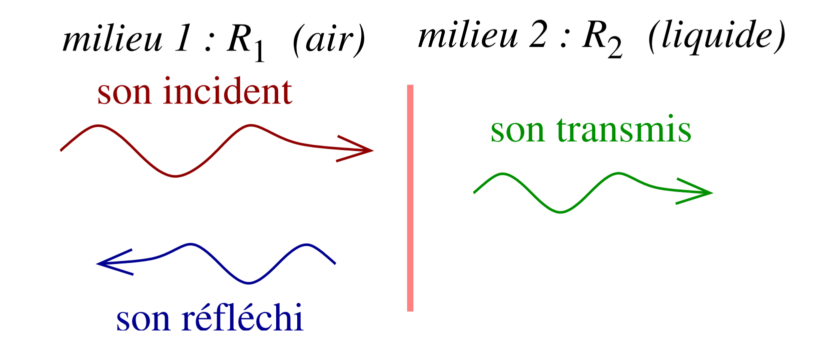
Ainsi $P_{\text{e}} = 20 \times P_{\text{t}}$

- Si l'on prend en compte l'effet de levier :

$$P_e = 26 \times P_t$$

Transmission à l'interface oreille moyenne / oreille interne

Transmission à une interface



- Le son incident se divise en un son transmis et un son réfléchi.
- L'énergie se conserve : $I_{\text{incidente}} = I_{\text{réfléchie}} + I_{\text{transmise}}$
- On montre que :
$$\frac{I_t}{I_i} = 1 - \left(\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2}\right)^2$$
- Si R_1 et R_2 sont très différents, le son est entièrement réfléchi.
- Le son n'est transmis que si $R_1 \simeq R_2$.

Transmission oreille externe $\Leftrightarrow$ interne

- $\begin{cases} R_{\text{air}} = 400\,\text{Pa.s/m} \\ R_{\text{eau}} = 1,5 \times 10^6\,\text{Pa.s/m} \end{cases}$
- En l'abscence de l'oreille moyenne :
$I_{\text{transmise}} \simeq 10^{-3} \times I_{\text{incidente}}$
- Avec la chaîne des osselets :
$P_{\text{étrier}} \simeq 26 \times P_{\text{tympan}}$
- Dans ces conditions, la résistance "apparente" au niveau de la platine de l'étrier vaut :
$R_{\text{étrier}} = (26)^2 \times R_{\text{air}}$
- On parle d'adaptation de résistance.
- Dans ces conditions :
$I_{\text{transmise}} \simeq 0,5 \times I_{\text{incidente}}$

III.1 Le Logarithme et l'échelle logarithmique

<u>Définition :</u> Le logarithme (en base n) d'un nombre est la puissance à laquelle il faut élever n pour retrouver le nombre considéré.

écriture mathématique : $\begin{cases} y = \log_n(x) \\ x = n^y \end{cases}$

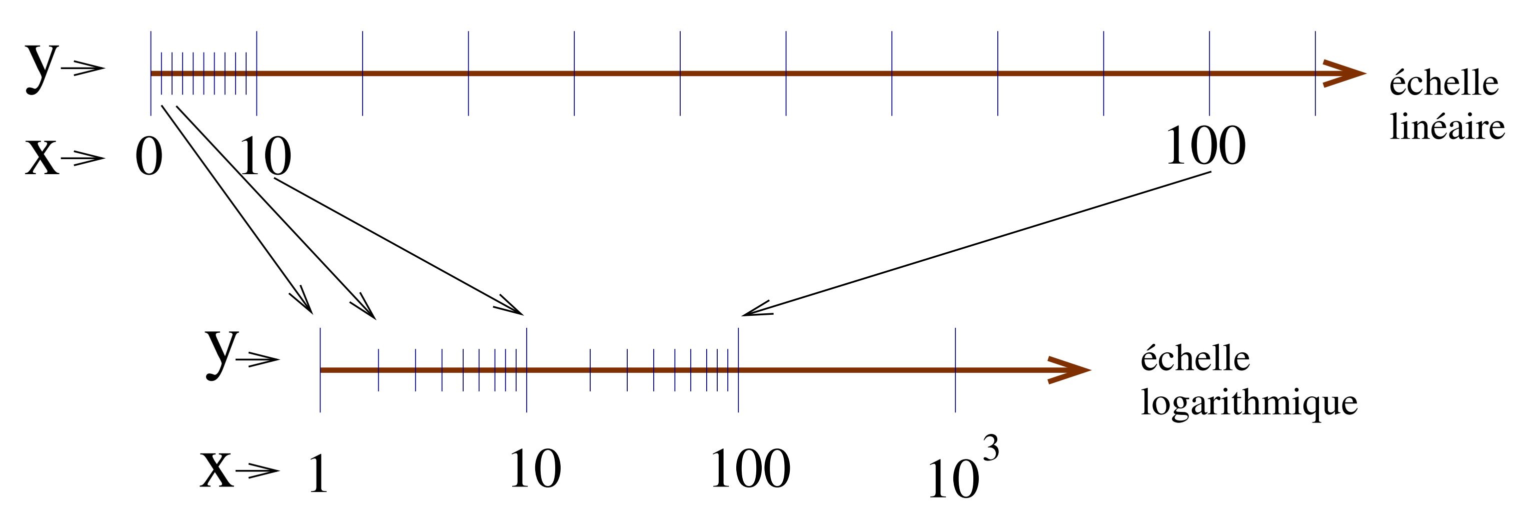
<u>Log base 10 :</u>

$$y = \log_{10} x \Leftrightarrow x = 10^y$$

Habituellement, on omet de noter la base "10".

Exemple : Le logarithme en base 10 de 100 est 2. En effet, $\log_{10}(100) = 2$ car $10^2 = 100$

Échelle logarithmique



La représentation sur une échelle "log" permet de représenter plusieurs ordres de grandeur.

III.2 Niveau d'intensité acoustique

Niveau de pression SPL

$N_{\text{SPL}} = 10 \times \log\left(\text{I}/10^{-12}\right)$

SPL = Sound Pressure Level

10^{-12} W/m^2: Seuil d'audition à 1 kHz

Niveau de pression HTL

$N_{\text{HTL}} = 10 \times \log\left(\text{I}/\text{I}_F\right)$

HTL = Hearing Threshold Level

I_F : Seuil variant selon la fréquence

- N n'a pas de dimension physique et donc pas d'unité. On parle alors d'un indice.
- Il sagit du décibel noté dB
- déci : préfixe "$10\times$"; Bel : indice de "$\log\left(I/10^{-12}\right)$"

On peut calculer I à partir de N, en utilisant la définition du log.

$$N_{\text{SPL}} = 10 \log\left(\frac{I}{10^{-12}}\right) \Leftrightarrow I = 10^{-12} \times 10^{N_{\text{SPL}}/10}$$

- ATH: "Absolute Threshold of Hearing" *Seuil absolu d'audition*
- Correspond au niveau SPL du seuil d'audition

f(Hz)	125	250	500	1 k
ATH (dB)	$19,2$	11	$6,2$	$3,4$
I (W/m^2)	$8,3.10^{-11}$	$1,3.10^{-11}$	$4,2.10^{-12}$	$2,2.10^{-12}$
f(Hz)	2 k	4 k	8 k	16 k
ATH (dB)	$-0,3$	$-3,4$	$4,8$	$65,9$
I (W/m^2)	$0,9.10^{-12}$	$0,5.10^{-12}$	$3,0.10^{-12}$	$3,9.10^{-6}$

III.3 Ordres de grandeur de l'échelle SPL

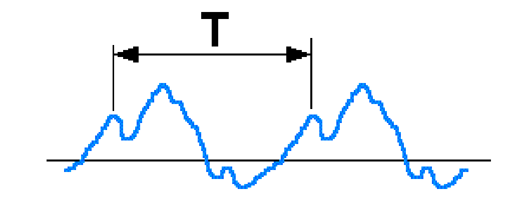
0 dB	....	Seuil d'audition à 1 kHz
10 dB	....	chambre anéchoïque (**très calme**)
20 dB	....	studio d'enregistrement
30 dB	....	résidence tranquille (**calme**)
40 dB	....	conversation normale
50 dB	....	restaurant tranquille
60 dB	....	voiture sur route (**bruyant**)
70 dB	....	Rue animée, petit orchestre
80 dB	....	Niveau standart d'écoute d'une stéréo, usine
85 dB	....	Seuil de dommage pour l'oreille en exposition continue (**danger**)
100 dB	....	Tronçonneuse, moteur deux temps
110 dB	....	Concert de rock, boîte de nuit
120 dB	....	voiture de course (**Seuil de douleur**)
130 dB	....	Marteau piqueur
140 dB	....	Détonation d'une arme à feu
150 dB	....	Trompette jouée à 15 cm
160 dB	....	A proximité d'un réacteur d'avion

$IV.1$ Mouvement périodique : Période et fréquence

Mouvement périodique :

Mouvement se répétant à intervalles réguliers.

intervalle ⇒ Période



Période Temporelle d'une onde acoustique ⇒ T (seconde)

	T(s)	f(Hz)
infrasons	$> 0,05$ s	< 20 Hz
Graves	$2,5$ ms $\leftrightarrow 0,05$ s	$20 \leftrightarrow 400$ Hz
Médiums	$625\ \mu$s $\leftrightarrow 2,5$ ms	$400 \leftrightarrow 1\,600$ Hz
Aigus	$50\ \mu$s $\leftrightarrow 625\ \mu$s	$1\,600 \leftrightarrow 20000$ Hz
ultrasons	$50\ \mu$s $<$	> 20 kHz

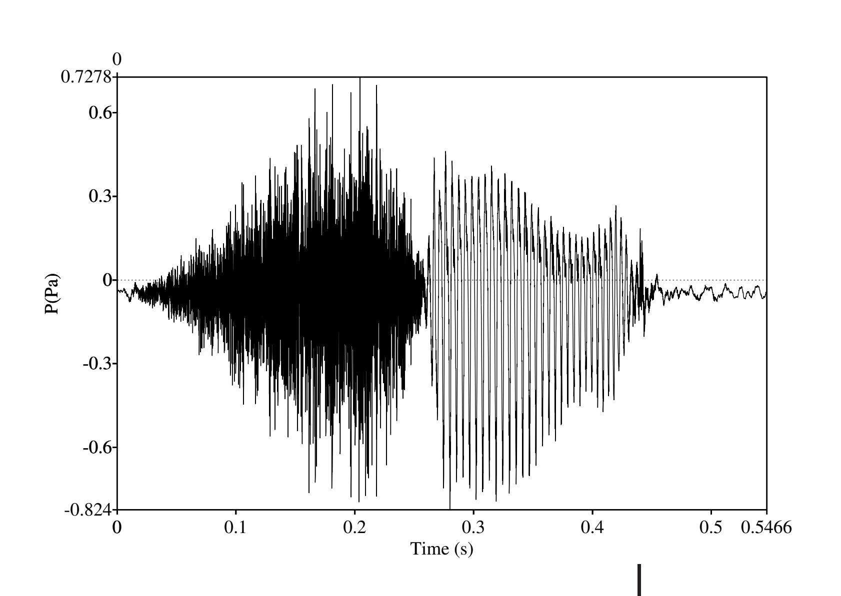
Son voisé:
- Homme : $\simeq 100$ Hz
- Femme : $\simeq 200$ Hz
- Enfant : $\simeq 300$ Hz

$$f = 1/T$$

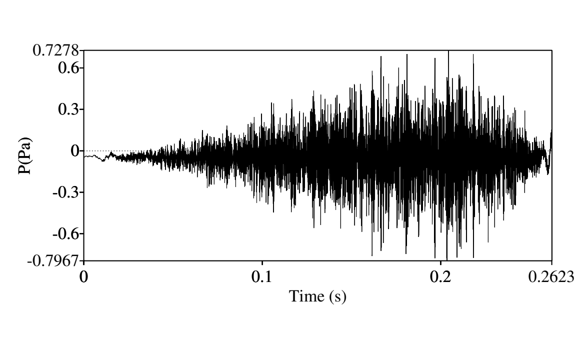
- Fréquence : Nombre de périodes pendant une seconde
- unité : Hertz (Hz)
- 1 Hz $= 1$battement/ s

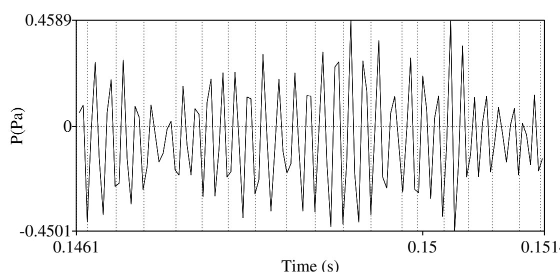
Heinrich Hertz : 1857-1894

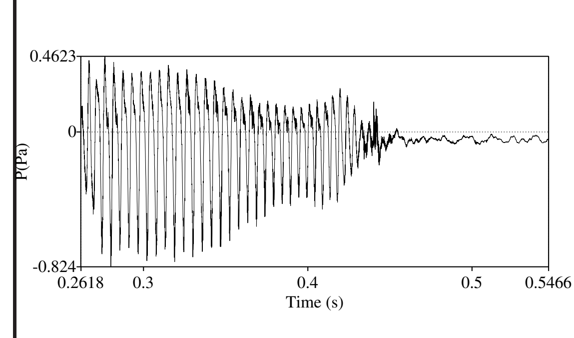
$IV.2$ Chronogramme du mot “si”

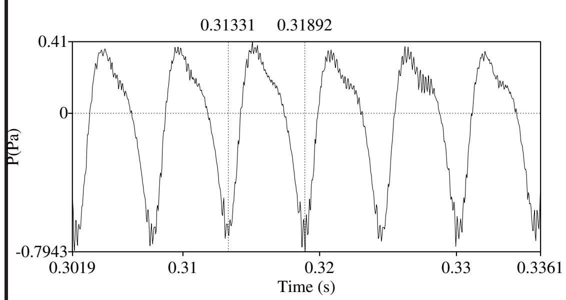


- Consonne [s] non voisée de 0 s à 0,25 s.
- Fréquence élevée $\simeq 3,3$ kHz.
- Son correspondant à du bruit.
- Voyelle de 0,25 s à 0,5 s.
- Fréquence du son voisé $\simeq 178$ Hz.
- Son possédant une structure harmonique.









Période :

$$\begin{aligned} T &= 0,31892 - 0,31331 \\ &= 0,00561 \text{ s} \\ &= 5,61 \text{ ms} \end{aligned}$$

Fréquence :

$$\begin{aligned} f &= 1/(5,61 \times 10^{-3}) \\ &= 10^3/5,61 \\ &= 0,178 \times 10^3 \\ &= 178 \text{ Hz} \end{aligned}$$